

補助事業番号 2017M-158  
補助事業名 2017年度 複数台ロボットアームの省エネルギー干渉回避スケジューリング  
補助事業  
補助事業者名 大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授 西 竜志

## 1 研究の概要

多品種少量生産の現場では、人手不足を補うために生産活動や組立、検査などの複雑な作業を人間からロボットによる自動化が行われている。複数台ロボットアームを限られた範囲で省エネルギー性を考慮して効率良く動作させるためには、複数台ロボット間の干渉回避を考慮に入れた動作計画やスケジュールの最適化が必要となる。

本研究課題では、複数台ロボットアームの運搬動作に対して、各ロボットのスループットと消費エネルギーを最小化するような干渉回避スケジューリング手法を開発した。開発した手法を用いて、双腕型ロボットアームによるワーク運搬動作や数十台から数百台の複数台自律移動ロボットを用いた搬送スケジューリングの省エネルギー搬送経路計画問題に対して、省エネルギー性とスループットの関係性を明らかにした。

## 2 研究の目的と背景

自律ロボットは社会のさまざまな場面で利用され、自動車の自動運転や配送、搬送の自動化が進んでいる。自律ロボットの導入は、人手不足の解消など企業活動だけでなく、人間社会全体の向上に大きく貢献する。自律ロボットの自動化に関する研究は1台から数台のロボットが対象とされてきたが、近年では数100台のロボットを用いた自動搬送などに用いられている。複数台ロボットに関する制御はその複雑さから極めて困難であるが、従来研究では省エネルギー性が考慮されていない。現状では、技術者の勘と経験によって制御則が記述されている。自律ロボットの複合化とともに、デッドロックの回避方策や省エネルギー性能を持つスケジューリング方策を、経験則などから開発することは困難となってきた。

そこで、本研究では双腕型ロボットアームのワーク運搬動作や複数台の自律型搬送ロボットなどの複数台ロボットを対象として、省エネルギー性と作業完了時間の両方を考慮した動作計画と実機による省エネルギー性の検証を目的とした。

## 3 研究内容

### ① 双腕ロボットアーム実験装置による省エネルギー動作検証実験

複数台ロボットアームの干渉回避スケジューリングのための実験装置として、平成29年度(1年目)に川崎重工製双腕型ロボットアーム実験装置duAro(デュアロ)の動作検証を行った(写真1)。ベルトコンベアラインからの双腕アームにより、干渉回避をしながら、ピッキング動作を行う動作計画とスケジューリング手法を検討した。この動作の拡張として、省エネルギー性と搬送効率の両方の観点から任意のピック

アップ点における干渉回避スケジューリングと動作計画を行うための方法を検討した。数値シミュレーションの結果、提案した動作計画手法を利用することで、双碗ロボットアームはシングルロボットアームに比べて高い搬送能力を有することが示された（図1）。

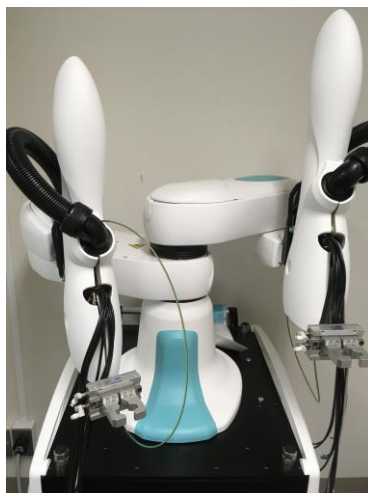


写真1. 双碗型ロボットアーム実験装置 (duAro: 川崎重工製)

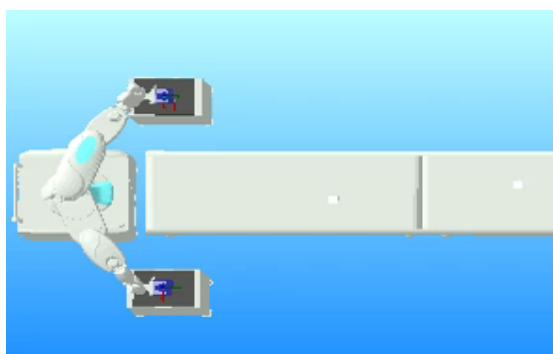


図1. ベルトコンベアラインのピッキングシミュレーション

これらの研究成果を計測自動制御学会 SICE Annual Conference 2018で公表した。また、平成30年12月には国際会議IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2018において、双碗ロボットアームの省エネルギースケジューリングに関する研究成果を公表した。

## ② 複数台移動ロボットの省エネルギースケジューリング手法の検討

複数台の移動ロボットが互いに衝突を回避しながら初期位置から目標位置までの搬送時間を最小とする搬送ルートを作成するための搬送経路計画問題、およびレイアウトパスの設計問題に対する効率的な最適化アルゴリズムを検討した。

### ③ 複数台移動ロボット実験装置の導入と制御装置試作

複数台の搬送ロボットによる省エネルギー干渉回避スケジューリングに関する研究を実施するために、二輪駆動台車ロボット：メガローパーを5台導入し、省エネルギー干渉回避スケジューリングを4台の移動ロボットで実現するための実験装置の導入と制御装置の試作を行った(写真2)。

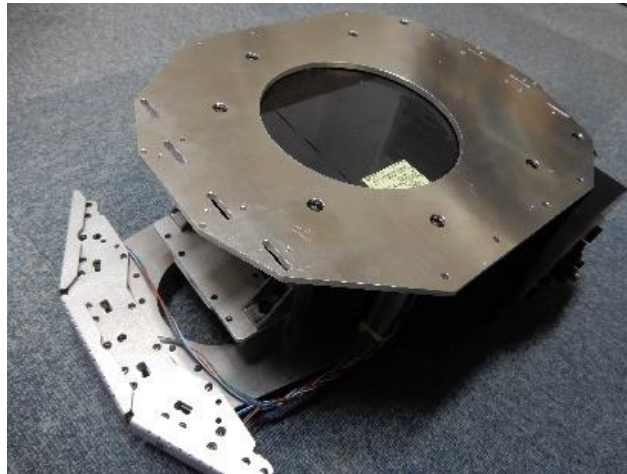


写真2. 複数台移動ロボット実験装置(メガローパー：ヴィストン製)

### ④ 複数台移動ロボットのレイアウトとジャストインタイム搬送法の検討

複数台移動ロボットのさらなる省エネルギー性を追求するための倉庫内のレイアウト配置計画や定められた搬送期日にちょうどタイミングで到着するジャストインタイム搬送を提案し、ビークルを待機させることにより無駄なエネルギーを削減できることを示した。

### ⑤ リアルタイムスケジューリング手法の検討

干渉回避を可能な限り短時間で計算するための計算アルゴリズムを検討した。

### ⑥ 外乱に対する対処法の検討

装置の処理時間の遅延やロット変更などの外乱を想定し、外乱に対応するための複数台ロボットアームの干渉回避スケジューリング手法を検討した。

## 4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

多品種少量生産のロボットアームのプランニングやe-commerce向け自動倉庫における搬送ロボットの性能改善、半導体製造装置や輸送機器だけではなく、コンテナターミナルにおける複数ロボットの協調動作による省エネルギーなどに応用できる。さらに研究が進捗すれば、自動運転

機能を有する複数台のビークルの自動運転時に複数のビークルを同時に制御することでビークル全体の干渉回避と省エネルギーを実現する技術に発展することが期待される。

## 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまでシミュレーションを中心とした省エネルギー性の検証や最適化効果の検証がメインであったが、本研究課題を通して、双腕型スカラロボットアーム、6軸ロボットアーム、自律型移動ロボットを導入し、開発したプログラムを用いてハードウェアを用いた実機による動作検証と実装が可能となった。これにより、研究内容の可視化や実装上での新たな課題発見が容易になり、教育活動においても大きな助けとなった。研究成果によって得られた知見やプログラムの開発は今後の教育活動だけでなく、広く社会に利用される可能性を示すことになった点で有意義であったといえる。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

### 【発表論文】

#### (1) 原著論文, 国際学会論文

1. Tatsushi Nishi, Yuki Mori, Energy Efficient Motion Planning of Dual-Armed Robots with Pickup Point Determination for Transportation Tasks, Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1401-1405, 2018.12
2. Tatsushi Nishi, Yushin Watanabe, Masaru Sakai, An Efficient Deadlock Prevention Policy for Noncyclic Scheduling of Multicluster Tools, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 1677-1691, 2018.10
3. Yuki Mori, Tatsushi Nishi, Energy-Efficient Scheduling of a Dual-Armed Robot for Transportation Works, Proceedings of the SICE Annual Conference 2018, pp. 284-287, 2018.9
4. Masaru Sakai, Tatsushi Nishi, Design of a Petri Net Supervisor for Multi-Cluster Tools to Improve Scheduling Performance, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 12, No. 3, 2018.7
5. Shuhei Akiyama, Tatsushi Nishi, A Multi-Commodity Flow Model for Guide Path Layout Design of AGV Systems, Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2017.12
6. Ryotaro Yamazaki, Tatsushi Nishi, Soh Sakurai, A Decomposition Method with Discrete Abstraction for Simultaneous Traffic Signal Control and Route Selection Problem with First-Order Hybrid Petri Nets, Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2017. 8
7. Masaru Sakai, Tatsushi Nishi, Effects of Optimal Supervisor on Scheduling Performance of Multi-Cluster Tools, Proceedings of International

Symposium on Scheduling 2017, pp. 117-120, 2017.7

8. Masaru Sakai, Tatsushi Nishi, Noncyclic Scheduling of Dual-Armed Cluster Tools for Minimization of Wafer Residency Time and Makespan, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 1-12, 2017.4

(2) その他の著作物（特許，総論等）

【特許】

1. 走行指令割付方法，コントローラ，および当該コントローラを備える搬送システム，特許出願予定
2. 走行決定方法，コントローラ，および当該コントローラを備える走行システム，特許出願予定

【学会発表】

1. 西田昂生，西竜志，要秀紀，熊谷賢治，東俊光，自律無人搬送車のジャストインタイム搬送経路計画問題に対するヒューリスティック解法，システム制御情報学会研究発表講演会，2019.5
2. 秋山周平，西竜志，多期間多品種ネットワーク設計問題に対するセルを用いたヒューリスティックの提案，計測自動制御学会システム情報部門講演会論文集，2018.11
3. 森友樹，西竜志，双腕ロボットアームのワーク運搬作業における省エネルギー干渉回避スケジューリング，システム制御情報学会2018講演論文集，144-5，2018.5
4. 秋山周平，西竜志，東俊光，熊谷賢治，橋爪美智，セルを用いたヒューリスティックによるAGVシステムのガイドパスレイアウト設計，生産システム部門研究発表講演会2018，2018.3
5. 酒井優，西竜志，スケジューリング性能の向上を目的とした最適スーパーバイザの検討，計測自動制御学会システム情報部門講演会論文集，2017.11

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

- ・研究発表用のポスター(図3)
- ・双腕ロボットアームの省エネルギー制御プログラム
- ・搬送シミュレーションプログラム

2020-07 SSI2018 研究奨励費優秀賞  
**多期間多品種ネットワーク設計問題に対するセルを用いたヒューリスティクスの提案**  
 秋山 高平, 西 竜志 大阪大学大学院 基礎工学研究科

**1. 研究背景**

● 社会システムとネットワーク設計  
 社会システムの問題を解決する際にネットワーク設計が重要である。

● 多品種ネットワーク設計問題  
 1. 2つの色、異なる形状のセルを組み合わせる。  
 2. 1つの色、異なる形状のセルを組み合わせる。  
 3. 2つの色、異なる形状のセルを組み合わせる。

**2. 多期間多品種ネットワーク設計問題**

● ネットワーク設計問題  
 コーヒーのネットワーク設計 (2D) を解くための問題を解くためのヒューリスティックな方法として提案されている。

● 定式化  

$$\min \sum_{i,j} c_{ij} x_{ij}$$

$$\sum_{i,j} x_{ij} = 1$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

**3. セルを用いた高効率法**

● 問題の分類と解法  
 1. 問題の分類  
 2. 問題の解法

● ネットワーク設計を改良していくことで近似的解を求める手法を提案  
 ネットワーク設計を改良していくことで近似的解を求める手法を提案

**4. 数値実験**

● パラメータと性能の関係  
 1. パラメータ  
 2. 性能

● ネットワーク形状別の性能評価  
 1. ネットワーク形状  
 2. 性能

**5. まとめ**

● 多品種ネットワーク設計問題を拡張した多期間多品種ネットワーク問題を定式化した。  
 ● 多期間多品種ネットワーク設計問題を解くためのヒューリスティックな方法として提案した。  
 ● 数値実験によって、提案手法の性能を評価した。

スケーリング性能の向上を目的とした最適スケジュールの検討  
 大阪大学大学院 基礎工学研究科 秋山高平 西竜志 博士 高平 竜志

**1. 研究背景**

● プリントシミュレーションにおけるタクトロック防止  
 1. タクトロック防止  
 2. タクトロック防止

**2. 可到達グラフ解法**

● 可到達グラフ解法  
 1. 可到達グラフ解法  
 2. 可到達グラフ解法

**3. 手法の拡張**

● 新たな手法が必要  
 1. 新たな手法  
 2. 新たな手法

**4. 数値実験**

● 数値実験  
 1. 数値実験  
 2. 数値実験

**5. まとめ**

● 可到達グラフ解法に基づくタクトロック防止手法を拡張し、But Making だけでなく Legal Making も可能にする手法を提案した。  
 ● 拡張した Legal Making 手法のための評価指標を 2 提案した。  
 ● 数値実験によって、提案手法がタクトロック防止できてきていることを確認した。また、シミュレーションによってメイクスパンを比較した。

図3. 広報用のポスター

(2)(1)以外で当事業において作成したもの  
 上記 論文, 学会発表予稿集 等

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 大阪大学大学院基礎工学研究科

(オオサカダイガクダイガクインキソコウガクケンキュウカ)

住 所: 〒560-8531

大阪府 豊中市 待兼山町1-3

大阪大学 大学院基礎工学研究科 D548

担 当 者: 准教授・西竜志(ニシタツシ)

E - m a i l: [nishi@sys.es.osaka-u.ac.jp](mailto:nishi@sys.es.osaka-u.ac.jp)

U R L: <http://www-inulab.sys.es.osaka-u.ac.jp/nishi>